

論文の内容の要旨

論文題目	電子機器の静電気放電に対するノイズ耐性試験法における放電現象とその特性解析
学位 申請者	石田 武志

帯電した人体から発生する静電気放電（ESD: Electrostatic Discharge）の電子機器に対する電磁ノイズ耐性試験は，国際電気標準会議（International Electrotechnical Committee: IEC）IEC 61000-4-2（以下，国際規格）で規定している。このESD試験は，人体の手に持った金属物からのESDが，卓上又は，床置き
の電子機器に影響する現象を模擬している。人体からの実際のESDは，空気中のギャップを介した火花を伴う気中放電となるが，気中試験は，周囲の温度・湿度条件，接近速度，人体側の金属物の形状及び放電対象の形状，また表面の粗さ・汚染度などの影響により，放電が安定しないことが知られている。このため国際規格では，1989年の改訂で，電子機器の金属部分へのESD試験は，予め放電電極を接触させてESD発生器内部のリレースイッチをオンすることで，人体相当の静電容量を充電したコンデンサに蓄えた電荷を注入する接触放電を主とした試験方法を規定した。この試験方法は，ESD試験の合理性及び試験再現性の観点では優位な方法であるが，実際に帯電した人体からの気中放電でのESD現象とは異なる試験器仕様及び試験方法が規定され，また限定された条件での試験を実施している。

本論文では，帯電人体から発生するESDが電子機器に影響する現象を確認し，その現象を基に国際規格で規定する接触放電及び気中放電で起こる現象を実験により差異を明らかにし，分析することで，ESD耐性試験の課題を提示することを目的とした。

はじめに規格で規定する接触放電と気中放電での放射電磁ノイズ特性を測定し，そのノイズの発生メカニズムをモデル化し，発生タイミングとそのノイズ振幅特性を解析した。測定及び解析結果から，規格で規定する試験方法は，実際の帯電人体からのESD現象より過度又は過小なESD耐性を評価する可能性があることが明らかになった。これは，人体からのESDは，気中放電となるため，印加電圧の上昇と共に，電磁ノイズは増大するが，ある電圧より弱まる傾向を確認した。このことは印加電圧に一次比例する接触放電の現象とは異なる。また充電及び放電を制御する内部リレースイッチのタイミングで，ESD放電とは異なる周波数成

分をもつ電磁ノイズの発生とその特性が明らかとなった。更にこれらの電磁ノイズを低減する新しい制御シーケンスを構築し、その低減効果を実証した。

つぎに、国際規格で規定する接触放電の特異現象として、接触時の不良に起因する微小ギャップを伴う ESD 発生器からの放電電流の測定によって、規格で規定する放電電流より振幅で 2 倍程度増大し、立ち上り時間で 5 倍程度短縮する特異現象を発見した。国際規格で規定する接触放電での印加電圧 2 kV～8 kV 及び微小ギャップの距離を 30 μm ～1000 μm として、この 2 つのパラメータに対する放電電流の特性を明らかにした。その結果、非常に複雑な特性を示すことが分かった。更にこの微小ギャップを介した接触放電の特異現象に対する回路モデルを提案し、この放電電流現象が発生する原理推定をおこない、火花抵抗を考慮した計算式による放電電流を増大させる機構の解明を試みた。

最後に、帯電人体が手にもったドライバーなどの金属棒から発生する ESD を想定した国際規格の試験では想定していない人体に装着するウェアラブル電子機器の ESD のストレスを放電電流の測定により評価した。ウェアラブル電子機器を想定した金属電極を人体の頭、上腕及び、腰に取り付け、更に手にもった金属棒からの各部分から発生する放電電流を測定し、国際規格での放電電流と比較した。この結果、人体の胴体部分からの放電電流は、規格で規定する放電電流は、最大値で数倍高く、波形エネルギーで最大 5 倍大きくなり、また頭、上腕、腰部の胴体部分に近い部位での放電電流の減衰時定数が、国際規格の ESD 発生器及び手からの放電電流より 1/4 程度短縮することがわかった。この現象より、国際規格で定める 150 pF、330 Ω の人体静電容量・放電抵抗から発生する放電電流とは大きく異なり、既存の ESD 試験では対応できないことが明らかとなった。この波形エネルギー及び放電電流の減衰時定数から人体各部の静電容量及び放電抵抗値を推定した。その結果、腰部の静電容量が一番大きく、頭、上腕及び腰部の放電抵抗は、国際規格の 1/3 程度であることが推定できた。この値を更に検証するため、人体各部に金属電極を取付けたときの人体静電容量及び抵抗の推定を S パラメータの S_{11} 測定により実測し推定値の有効性を確認した。

これら研究により、次の結果が得られた。

- 国際規格の ESD 試験では、不要かつ特性の異なる電磁ノイズが発生し、電子機器は、自然界での気中放電とは異なる電磁ノイズに曝される。
- 国際規格で独自に規定する接触放電では、試験方法の誤りや、試験対象の状態によっては、過度な ESD 試験を実施する可能性があり、その現象は複雑な機構からなっている。
- 人体装着するウェアラブル電子機器の ESD 耐性試験は、国際規格で規定する ESD 試験方法では、対応できない。

このことより、自然界で発生する帯電人体からの電子機器に対する ESD 現象と国際規格で規定している ESD 発生器および ESD 試験方法における相違点、規定できていない ESD 現象及び接触放電の課題を明らかにした。これらの課題を今後の電子機器の ESD 耐性試験に提唱する。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 石田 武志

審査委員主査 肖 鳳超

委員 唐沢 好男

委員 和田 光司

委員 ※藤原 修

委員 ※石上 忍

電子機器の静電気放電（ESD: Electrostatic Discharge）試験では、実際に生じる自然現象いわゆる気中放電とは異なるが、再現性の観点から接触放電による試験を実施している。本研究ではこの接触放電について、まず気中放電とは異なる電磁ノイズ放射が発生することを定量的に評価し、その発生機構の解析及び低減方法を提示・検証した。また、接触不良などによる微小ギャップが生じた状況では、放電電流が増大かつ急峻な立ち上がりとなる現象となることを発見し、その発生機構を解明した。更にウェアラブル電子機器の ESD ストレスを、人体からの放電電流の測定により解析し、そこから得た静電容量値と抵抗値は、現行試験では対応できていないことを確認した。

本論文は、つぎの 6 つの章で構成されており、3 章～5 章が申請者のおこなった研究である。6 章に全体の結論を述べている。

第 1 章「序章」では、本研究を進めるにあたり、ESD 試験が抱える課題項目を挙げ、その課題と本研究との関わり及び解決に向けての取り組みを示し、研究目的を達成するための過程を示している。

具体的に本研究では、ESD 試験と実際の ESD 現象との相違や、ESD 試験での特異現象及び現行の ESD 試験では、試験条件を満たしていない分野に関する課題を明らかにし、今後の ESD 試験規格の改善提案及び ESD 試験に関する考え方、試験の注意点を明確にして、現行の ESD 耐性評価法の再確認及び改善提案し、電子機器に対する ESD 耐性の向上につなげることを目的としている。

第 2 章「電子機器への ESD 現象と ESD 耐性試験」では、帯電人体による ESD 現象と、ESD 試験の歴史、技術背景を示し、本論文で扱う上での基本的な ESD 現象及び ESD 試験の情報・知識を与えている。

電子機器に対する EMC 耐性試験において、ESD 試験は、ESD 現象の複雑さゆえ試験再現性を優先し、実際の帯電人体からの ESD 現象とは異なる方法で実施されている。このことが、ESD 試験の更なる課題となっている。

第 3 章「ESD 試験における接触放電と気中放電の直前直後に誘導される電磁ノイズ」では、ESD 発生器における本来試験の目的には不要な電磁ノイズの測定、発生構造の解析及びその改善を提示している。

ESD 発生器からの磁界プローブによる電磁ノイズを測定し、その結果、接触放電及び気中放電の両方でリレースイッチ動作による ESD 試験の直前直後に、電磁ノイズが発生していることを確認した。測定及び解析結果から、規格で規定する試験方法は、実際の帯電人体からの ESD 現象より過度又は過小な ESD 耐性を評価する可能性があることが明らかになった。更にこれらの電磁ノイズを減少させるために、リレースイッチの新たな機能制御シーケンスを提案し、ノイズ測定から、シーケンスの有効性を確認することができた。

第 4 章「ESD 耐性試験における微小ギャップを伴う放電電流の測定と現象考察」では、ESD 試験固有の接触放電試験にだけ発生する放電の特異現象を測定し、その発生構造を構築した。接触時の不良に起因する微小ギャップを伴う ESD 発生器からの放電電流の測定によって、規格で規定する放電電流より振幅で 2 倍程度増大し、立ち上り時間で 5 倍程度短縮する特異現象を発見した。更にこの微小ギャップを介した接触放電の特異現象に対する回路モデルを提案し、この放電電流現象が発生する原理推定をおこない、火花抵抗を考慮した計算式による放電電流を増大させる機構の解明を試みた。

第 5 章「ウェアラブル電子機器を想定した人体に取り付けた金属の ESD モデルの放電電流の特性」では、ESD 試験規格では、想定していない人体各部に取付けた電子機器の対する ESD ストレスを放電電流の測定により推察し、更に人体各部のインピーダンスを測定することで、その妥当性を確認した。この現象より、国際規格で定める 150 pF、330 Ω の人体静電容量・放電抵抗から発生する放電電流とは大きく異なり、既存の ESD 試験では対応できないことが明らかとなった。

第 6 章 「結論」では、本論文全体の結論及び今後の課題を記述した。

本研究では、以上のように ESD 試験の現行規格の課題、ESD 試験に関する考え方、試験の注意点を明確にした。さらに現行の ESD 耐性評価法の改善に向けた提案をおこなった。本研究の研究結果より、電子機器に対する ESD 耐性の向上につなげることを期待できる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。